■ CTAHДAPTHЫE ОБРАЗЦЫ / REFERENCE MATERIALS

DOI: 10.20915/2687-0886-2021-17-4-13-21 УДК 620.179.16:620.172.21:53.089.68

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИМ ВИДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© И. Н. Матвеева. В. В. Толмачев

Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева» (УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»), г. Екатеринбург, Российская Федерация e-mail: sertif@uniim.ru

Поступила в редакцию — 25 февраля 2021 г., после доработки — 20 мая 2021 г. Принята к публикации — 30 сентября 2021 г.

Статья посвящена разработке набора стандартных образцов механических свойств сталей. В настоящее время при измерении механических напряжений прослеживаемость результатов измерений обеспечивается к эталону времени, а не механических напряжений, системный подход к обеспечению единства измерений механических напряжений требует разработки основы для сравнения.

Цель исследования – разработка и аттестация стандартных образцов специальной формы, прослеживаемых к единицам СИ – силе и длине, предназначенных для передачи единицы величины механических напряжений средствам измерений, реализующим временной метод акустического вида неразрушающего контроля, основанный на явлении акустоупругости.

В статье рассматриваются ключевые этапы процесса разработки стандартных образцов: выбор исходного материала стандартных образцов; исследование однородности исходного материала; проведение экспериментальных исследований с использованием образцового средства измерений (государственного эталона единицы силы 1 разряда) и установление на основе этих исследований метрологических характеристик стандартных образцов.

В результате испытаний с целью утверждения типа был утвержден набор стандартных образцов механических свойств сталей ГСО 11544–2020/11545–2020. Аттестованными характеристиками стандартных образцов набора являются напряжение $\sigma_{n\eta}$, предел пропорциональности; напряжение $\sigma_{0,2}$, предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации 0,2%; напряжение σ_{s} , предел прочности (временное сопротивление); приращение напряжения при приращении относительного удлинения 1% (модуль

Ссылка при цитировании:

Матвеева И. Н., Толмачев В. В. Разработка стандартных образцов для обеспечения прослеживаемости измерений механических напряжений акустическим видом неразрушающего контроля // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17. № 4. С. 13—21. https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-4-13-21

For citation:

Matveeva I. N., Tolmachev V. V. Engineering of reference materials for providing traceability of measurements of mechanical stresses by acoustic type of nondestructive check. *Measurement Standards. Reference Materials.* 2021;17(4): 13–21 https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-4-13-21 (In Russ.).



упругости II рода). Границы допускаемых значений относительной погрешности аттестованных значений при доверительной вероятности 0,95 стандартных образцов набора не превышают 12%. Авторы считают, что набор стандартных образцов механических свойств сталей ГСО 11544—2020/11545—2020 обеспечит метрологическую прослеживаемость результатов измерений механических напряжений средствами измерений, реализующими временной метод акустического вида неразрушающего контроля, при использовании ГСО в качестве основы для сравнения в поверочной схеме.

Ключевые слова: механические свойства стали, напряженно-деформированное состояние, временной метод акустического вида неразрушающего контроля, явление акустоупругости, предел пропорциональности, предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации 0,2%, предел прочности (временное сопротивление), модуль упругости, стандартный образец

DOI: 10.20915/2687-0886-2021-17-4-13-21

ENGINEERING OF REFERENCE MATERIALS FOR PROVIDING TRACEABILITY OF MEASUREMENTS OF MECHANICAL STRESSES BY ACOUSTIC TYPE OF NONDESTRUCTIVE CHECK

© Ilona N. Matveeva, Vladimir V. Tolmachev

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology,
Ekaterinburg, Russian Federation
e-mail: sertif@uniim.ru

Received – 25 February, 2021. Revised – 20 May, 2021. Accepted for publication – 30 September, 2021.

The article presents the investigation of a certified reference material (CRM) of the steels mechanical properties. At present traceability of measurement results of mechanical stresses is ensured to the standard of time, but not mechanical stresses, and a metrological approach to ensuring the uniformity of measurements of mechanical stresses requires the development of a basis for comparison.

The aim of the work was the characterization and certification of standard samples of a special form, traceable to SI units – force and length, intended for transferring a unit of magnitude of mechanical stresses to measuring instruments that implement a temporary method of acoustic type of nondestructive check based on the phenomenon of acoustoelasticity. The article discusses the key stages of the development of reference materials: selection of the source material for reference materials; study of the homogeneity of the source material; carrying out experimental studies with the use of reference device (the state standard unit of strength of the 1st category) and establishing the metrological characteristics. As a result of type approval tests CRM was registered in the State Register of CRM's as GSO 11544–2020/11545–2020. The certified characteristics of the CRM are proportional limit mechanical stress σ_{pl} ; proof strength $\sigma_{0,2}$ (plastic extension 0,2%); tensile strength σ_{e} ; modulus of elasticity E. Limits of the relative error of the certified values at a confidence level of 0,95 do not exceed 12%. The authors believe that the CRM of the mechanical properties of steels GSO 11544–2020 / 11545–2020 will provide metrological traceability of the results of measurements of mechanical stresses by measuring instruments that implement the by acoustic type of nondestructive check, when using the GSO as a basis for comparison in the verification scheme.

Keywords: mechanical properties of steel, stress-strain state, tentative method of acoustic type of nondestructive testing, acoustoelasticity, limits of proportionality, proof strength (plastic deformation 0,2%), tensile ultimate tensile strength, elasticity model, reference material



Используемые в статье сокращения:

СО – стандартный образец

НДС – напряжено-деформированное состояние

НК – неразрушающий контроль

Введение

В настоящее время в связи с необходимостью анализа безопасности с целью оценки возможности эксплуатации металлических конструкций (магистральные трубопроводы, агрегаты атомных электростанций, сосуды под давлением, несущие строительные конструкции и т. п.) на опасных производственных объектах в газовой, нефтяной, нефтехимической промышленности, а также в машиностроении, атомной энергетике, коммунальном хозяйстве и других отраслях используются акустические виды НК [1–13].

Для оценки вероятности пластического разрушения ответственных узлов конструкций и оборудования используются приборы, реализующие временной метод акустического вида НК, позволяющие измерить текущие механические напряжения, возникшие в результате технологических воздействий.

Abbreviations used in the article:

CRM – certified reference material

SSS - stress-strain state

NC - nondestructive check

Чтобы обеспечить достоверность результатов измерения механических напряжений приборы, реализующие временной метод акустического вида НК, должны обладать прослеживаемостью к эталону соответствующей физической величины (рис. 1). Однако измеряемой величиной в указанных приборах, как показал анализ реестра утвержденных типов средств измерений, является время прохождения упругих волн различных типов (Р и S), возбуждаемых в материале контролируемого объекта, т. е. прослеживаемость обеспечивается к эталону времени, а не механических напряжений. Анализ методик поверки подтвердил, что применяемые для поверки эталоны (осциллограф, генератор импульсов и частотомер) не передают единицу механических напряжений поверяемым приборам.

Для контроля НДС применяют стандартизованные методики измерений [14–18], которые предусматривают



Рис. 1. Обеспечение прослеживаемости измерений к эталонам, воспроизводящим единицы СИ Fig. 1. Ensuring traceability of measurements to standards reproducing SI units



передачу размера единицы механических напряжений путем построения градуировочной характеристики на образце, изготовленном из материала, аналогичного материалу в исследуемой конструкции или оборудовании. При этом полностью игнорируется факт, что свойства материалов в исследуемой конструкции (оборудовании) определялись на образцах другой формы и размера, и не учитывается вклад от неоднородности исходного материала по механическим свойствам, а для градуировочной характеристики, полученной методом регрессионного анализа, не оценивается неопределенность. Таким образом, нарушается основной принцип обеспечения прослеживаемости измерений НДС – результат должен быть соотнесен с основой для сравнения через документированную неразрывную цепочку калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределённость измерения [19].

Обеспечение прослеживаемости механических напряжений имеет две альтернативные точки зрения.

Авторы [20] считают, что при калибровке приборов. реализующих временной метод акустического вида НК, обеспечивается прослеживаемость к единицам массы

и длины и допускают использование для калибровки СО с приписанным значением модуля упругости II рода (модуль Юнга).

В работах [21, 22] предлагается для обеспечения прослеживаемости к единице механических напряжений использовать только стандартные образцы, т. к. получение отклика от напряжений, возникающих в материале при нагружении, зависит от факторов внешнего воздействия, т. е. является зависимым от методики измерений, поэтому необходима прослеживаемость к первичной референтной методике национального метрологического института.

Оба методологических подхода предполагают необходимым условием обеспечения прослеживаемости механических напряжений использование СО.

Таким образом, для механических напряжений концепцию прослеживаемости можно представить на рис. 2, где основой для сравнения является материал, достаточно однородный и стабильный по отношению к определенному свойству, которое было установлено для того, чтобы его использовать в измерительном процессе, т. е. СО [23].



Рис. 2. Концепция прослеживаемости для механических напряжений Fig. 2. Traceability concept for stresses

Learning the Company of the Company



Цель настоящей работы состояла в разработке и аттестации СО специальной формы, имеющих прослеживаемость к единицам СИ — силе и длине, предназначенных для передачи единицы величины механических напряжений средствам измерений, реализующим временной метод акустического вида НК.

Материалы и методы

Для обеспечения репрезентативности измерений механических напряжений на объектах, изготовление которых может осуществляться с применением разных технологических процессов обработки, материалом СО являлись:

- лист проката из конструкционной стали;
- поковка из высококачественной конструкционной высоколегированной стали.

Исследование однородности материала СО в виде листа или поковки являлось сложной методологической задачей. Во-первых, стандартный образец, предназначенный для калибровки (градуировки) СИ, реализующих временной метод акустического вида НК, должен иметь форму и размеры (далее — форм-фактор), отличные от пропорциональных образцов, используемых для определения механических свойств при статическом растяжении [24]. Во-вторых, основной особенностью измерения механических свойств материалов является то, что измерения не могут быть повторены на одном и том же образце вследствие его разрушения при нагружении.

Неоднородность материала, из которого изготовляют СО, является источником существенной составляющей погрешности (неопределенности), поэтому на первом этапе акустическая анизотропия оценивалась косвенным методом [18], чтобы выбрать область, достаточную для изготовления СО по форм-фактору на листе или поковке, однородную по акустическим параметрам. Графическое представление результатов оценки акустической анизотропии приведено на рис. 3.

На втором этапе с помощью пропорциональных образцов оценивалась пространственная однородность распределения механических свойств в соответствии с алгоритмом [25], методом статического растяжения [24] пространственная однородность распределения механических свойств.

Материал СО признан однородным, однако полученными оценками погрешности (неопределенности) от неоднородности невозможно пренебречь, поэтому они учтены в оценке погрешности (неопределенности) аттестованных значений СО.

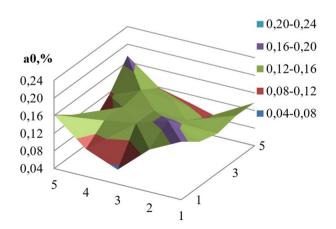
Установление аттестованных значений и оценивание погрешности аттестованных значений СО проведены с использованием государственного эталона единицы силы 1 разряда в соответствии с алгоритмами [25].

Срок годности СО установлен на основании данных о сроках годности аналогичных СО механических свойств сталей (ГСО 10957–2017). Срок годности СО – 10 лет для всех аттестованных характеристик.

Разработанный набор СО зарегистрирован в Государственном реестре утвержденных типов СО под номером ГСО 11544—2020/11545—2020¹.

Значения метрологических характеристик ГСО 11544— 2020/11545—2020 представлены в табл. 1 и 2.

¹ ГСО 11544—2020/ГСО 11545—2020 Стандартные образцы механических свойств сталей (набор ИНКО МСС—МН 1) // Федер. информац. фонд по обеспеч. единства измерений [сайт]. URL: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/19/items/1305846



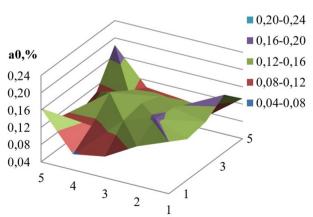


Рис. 3. Результаты оценки акустической анизотропии

Fig. 3. Results of the assessment of acoustic anisotropy

Таблица 1. Значения метрологических характеристик ГСО 11544—2020 Стандартный образец механических свойств сталей

Table 1. Metrological characteristics of GSO 11544–2020 Reference materials mechanical properties of steels

Аттестованная характеристика	Обозначение единицы величины	Интервал аттестованных значений	Границы допускаемых значений абсолютной погрешности аттестованного значения при доверительной вероятности $0.95, (\pm \Delta)$
Напряжение σ_{nu} , предел пропорциональности*	МПа (H/мм²)	100	± 12
Напряжение $\sigma_{0,2}$, предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации 0,2 % *	МПа (Н/мм²)	166	± 12
Напряжение $\sigma_{_{\rm B}}$, предел прочности (временное сопротивление)*	МПа (H/мм²)	307	± 12
Приращение напряжения при приращении относительного удлинения 1 % (модуль упругости) E*	МПа (H/мм²)	951	± 90

^{*} Наименования аттестованных характеристик соответствуют [24]

Таблица 2. Значения метрологических характеристик ГСО 11545—2020 Стандартный образец механических свойств сталей

Table 2. Metrological characteristics of GSO 11545–2020 Reference materials mechanical properties of steels

Аттестованная характеристика	Обозначение единицы величины	Интервал аттестованных значений	Границы допускаемых значений абсолютной погрешности аттестованного значения при доверительной вероятности 0,95, (\pm Δ)
Напряжение σ_{nu} , предел пропорциональности*	МПа (Н/мм²)	830	± 19
Напряжение $\sigma_{0,2}$, предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации $0,2\%^*$	МПа (H/мм²)	1017	± 22
Напряжение $\sigma_{_{\rm B}}$, предел прочности (временное сопротивление)*	МПа (H/мм²)	1198	± 12
Приращение напряжения при приращении относительного удлинения 1 % (модуль упругости) E*	МПа (H/мм²)	1954	± 50

^{*} Наименования аттестованных характеристик соответствуют [24]

Прослеживаемость аттестованных значений к единицам величин СИ была реализована посредством прямых измерений на Государственном эталоне единицы силы 1 разряда в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений силы, Государственной поверочной схемой для средств измерений длины в диапазоне от 1.10-9 до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

СО предназначены для испытаний в целях утверждения типа средств измерений механических напряжений, где используется временной метод акустического вида НК, основанный на явлении акустоупругости; поверки и калибровки средств измерений механических напряжений с использованием временного метода акустического вида неразрушающего контроля; контроля точности результатов измерений механических напряжений.



Обсуждение и заключение

Разработаны и утверждены СО механических свойств сталей, предназначенные для обеспечения единства измерений механических напряжений, не имеющие аналогов в Российской Федерации.

Отличительной особенностью разработанных СО является аттестация характеристик «предел пропорциональности $\sigma_{\rm nu}$ », «модуль упругости Е». Аттестованные значения этих характеристик позволяют однозначно задавать область упругой деформации при поверке и (или) калибровке средств измерений механических напряжений, использующих явление акустоупругости, установлении коэффициентов упруго-акустической связи [16].

Следует отметить, что аттестованные значения характеристики «Модуль упругости Е» отличаются от справочных данных - аттестованное значение характеристики для ГСО 11544-2020, изготовленного из конструкционной стали, составляет 95 ГПа, справочное значение составляет 200 ГПа, аттестованное значение характеристики для ГСО 11545-2020, изготовленного из высококачественной конструкционной высоколегированной стали, составляет 195 ГПа, справочное значение составляет 215 ГПа. Эта разница обусловлена рядом причин, каждая из которых дает свой вклад в достоверность справочных данных. Во-первых, имеющиеся справочные данные не содержат никакой информации о неопределенности полученных значений. Во-вторых, для справочных данных отсутствует информация о способе обработки материала, на котором получены справочные данные. Например СО, изготовленный из листа, подвергнутого прокатке, обладает поверхностным упрочнением, что отражается на значениях свойств материала, получаемых при его испытаниях. Поэтому ключевой задачей обеспечения достоверности результатов измерений механических свойств является наличие СО для калибровки (градуировки) средств измерений НК,

связанных с технологией изготовления контролируемых материалов.

Следует отметить, что назревшей проблемой законодательной метрологии в РФ является использование в поверочных схемах не только эталонов, но и основ для сравнения в виде ГСО и первичных референтных методик. Локальная поверочная схема, основанная на принципах, указанных на рис. 2, позволит использовать ГСО для испытаний с целью утверждения типа не только для СИ механических напряжений, реализующих временной метод акустического вида НК, но и для СИ, реализующих другие методы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заместителю генерального директора по развитию ООО «ИНКОТЕС» Пасманику Льву Абрамовичу, руководителю сектора научных исследований в области измерений силы и массы больших значений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» к. т. н. Шмигельскому Илье Юрьевичу за обсуждение в ходе разработки стандартных образцов; рецензентам за ценные замечания, касающиеся терминологии в области НК.

Вклад соавторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Материал статьи подготовлен на основе доклада, представленного на IV Международной научной конференции «Стандартные образцы в измерениях и технологиях» (С.-Петербург, 1–3 декабря 2020 г.).

Переводная версия статьи на английском языке планируется к публикации в книге Medvedevskikh S., Sobina E., Kremleva O., Okrepilov M. (eds.). Reference Materials in Measurement and Technology. RMMT 2020. Switzerland: Springer, Cham.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Мотова Е. А., Никитина Н. Е. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. Т. 10. № 3–2. С. 52–56. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2011-0-3–2(27)-52–56
- 2. Никитина Н. Е., Мотова Е. А., Тарасенко Ю. П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. Т. 11. № 3–1. С. 291–295. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-3–1(34)-291–295
- 3. Никитина Н. Е., Камышев А. В., Казачек С. В. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 51–60
- 4. Никитина Н. Е., Камышев А. В., Казачек С. В. Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 53—59.
- 5. Никитина Н. Е., Камышев А. В., Миронов Н. А. Измерение напряжений в технологических трубопроводах методом акустоупругости // Газовая промышленность. 2009. № 5. С. 64–67.



- 6. Electromagnetic-acoustic structural analysis of rolled bars / O. V. Muravieva [et al.] // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC. 2016. Vol. 1785. no. 1. P. 030017. https://doi.org/10.1063/1.4967038
- 7. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 16–28.
- 8. Мотова Е. А., Никитина Н. Е. Исследование акустической анизотропии конструкционных материалов при переменном нагружении // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции, Самара, 22—24 июня 2016 г. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева. 2016. С. 1617.
- 9. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом / В. В. Мишакин [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 27–30.
- 10. Application of the acoustic anisotropy approach for technical diagnostics of structures with large plastic deformations / A. K. Belyaev [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1785. № 1. P. 030004. https://doi.org/10.1063/1.4967025
- 11. Estimating the plastic strain with the use of acoustic anisotropy / A. K. Belyaev [et al.] // Mechanics of Solids. 2016. Vol. 51. no. 5. P. 606–611. https://doi.org/10.3103/S0025654416050149
- 12. Experimental investigation of the acoustic anisotropy field in the sample with a stress concentrator / A. I. Grishchenko [et al.] // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2017. Vol. 3, no. 1. P. 77–82. https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005
- 13. Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости / Е. Л. Алексеева [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 12. С. 33–44.
- 14. ГОСТ Р 52330—2005 Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования Москва: Стандартинформ. 2005. 5 с.
- 15. ГОСТ Р 53966—2010 Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния материала конструкций. Общие требования к порядку выбора методов Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2011. 4 с.
- 16. ГОСТ Р 55043—2012 Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упругоакустической связи. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2014. 8 с.
- 17. ГОСТ Р 56664—2015 Контроль неразрушающий. Определение напряженного состояния материала изделий машиностроения методами акустоупругости. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2016. 16 с.
- 18. ГОСТ Р 52731—2007 Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2007. 7 с.
- РМГ 29-2013 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Москва: Стандартинформ. 2014. 60 с.
- 20. Metrological traceability of the measured values of properties of engineering materials / G. Roebben [et al.] // Metrologia. 2010. Vol. 47. no. 2. P. 23–31. https://doi.org/10.1088/0026–1394/47/2/S03
- 21. 21. Establishment of traceability in the measurement of the mechanical properties of materials / G. W. Bahng [et al.] // Metrologia. 2010. Vol. 47. no. 2. P. 32–40. https://doi.org/10.1088/0026–1394/47/2/S04
- 22. Czichos H., Saito T., Smith L. Springer Handbook of Metrology and Testing. Berlin: Springer. 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16641-9
- 23. ГОСТ ISO Guide 30-2019 Стандартные образцы. Некоторые термины и определения. Москва: Стандартинформ. 2019. 9 с.
- 24. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва: ИПК Изд-во стандартов. 1997. 35 с.
- 25. РМГ 53–2002 ГСИ. Стандартные образцы. Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений. Москва: ИПК Изд-во стандартов. 2004. 6 с.

REFERENCES

- Motova E. A., Nikitina N. Y. The possibility of ultrasonic testing of compressor blades after exploitation and repair. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2011;10(3–2):52–56. (In Russ.). https://doi.org/10.18287/2541-7533-2011-0-3-2(27)-52-56
- 2. Nikitina N. E., Motova E. A., Tarasenko Y. P. Nondestructive testing of the working compressor blades of the aviation engine. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2012;11(3–1):291–295. (In Russ.). https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-291-295
- 3. Nikitina N. Y., Kamyshev A. V., Kazachek S. V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Defektoskopiya. 2015;(3):171–178. (In Russ.).
- 4. Nikitina N. Y., Kamyshev A. V., Kazachek S. V. Using the phenomenon of acoustoelasticity in the study of the stress state of technological pipelines. Defektoskopiya. 2009;(12):53–59. (In Russ.).
- 5. Nikitina N. E., Kamyshev A. V., Mironov N. A. Measurement of stresses in technological pipelines by the method of acoustoelasticity. GAS Industry of Russia. 2009;(5):64–67. (In Russ.).
- Muravieva O. V., Muraviev V. V., Gabbasova M. A., Petrov K. V., Zorin V. A. Electromagnetic-acoustic structural analysis of rolled bars. AIP Conference Proceedings. 2016;1785(1):030017. https://doi.org/10.1063/1.4967038
- 7. Muravyev V. V., Muravyeva O. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Balobanov E. N., Volkova L. V. Evaluation of residual stresses in rims of wagon wheels using the electromagnetic-acoustic method. Defektoskopiya.2011;47(8):512–521.

- Local Condition booth condition



- 8. Motova E. A., Nikitina N. Ye., Tarasenko Ur. P. Study of acoustic anisotropy of structural materials under variable loading. In: Problems and prospects for the development of engine building: materials of reports of the international scientific and technical conference, Samara, June 22–24 2016. Samara: Samara National Research University named after academician S. P. Queen. 2016.S. 16–17. (In Russ.).
- 9. Mishakin V. V., Gonchar A. V., Knrashkin K. V., Danilova N. V. The joint weld destruction study after static loading by acoustic method. Russian journal of heavy machinery. 2009;(7):27–30. (In Russ.).
- Belyaev A. K., Polyanskiy V. A., Grishchenko A. I., Lobachev A. M., Mansyrev D. I., Modestov V. S. et al. Application of the acoustic anisotropy approach for technical diagnostics of structures with large plastic deformations. AIP Conference Proceedings. 2016;1785(1):030004. https://doi.org/10.1063/1.4967025
- 11. Belyaev A. K., Lobachev A. M., Modestov V. S. et al. Estimating the plastic strain with the use of acoustic anisotropy. Mechanics of solids. 2016;51:606–611. https://doi.org/10.3103/S0025654416050149
- 12. Grishchenko A. I., Modestov V. S., Polyanskiy V. A., Tretyakov D. A., Shtukin L. V. Experimental investigation of the acoustic anisotropy field in the sample with a stress concentrator. St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2017;3(1):77–82. https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005
- 13. Alekseeva E., Alhimenko A., Belyaev A., Lobachev A., Polyanskiy V., Rostovykh G. et al. Evaluation of stress-strain state and cracking of weather-proof structural steel by acoustoelasticity. Construction of Unique Buildings and Structures. 2016;12(51):33–44. (In Russ.).
- 14. GOST R52330–2005 Non-destructive testing. Evaluation of deformations in industrial and vehicle structures. General requirements. Standartinform Publ.; Moscow: 2005. 5 p. (In Russ.).
- 15. GOST R53966–2010 Non-destructive testing. Evaluation of mechanical stresses in constructions material. General requirements for the order of methods choice. Standartinform Publ.; Moscow: 2011. 4 p. (In Russ.).
- 16. GOST R55043–2012 Non-destructive testing. Evaluation of elastic-acoustic coefficients. General requirements. Standartinform Publ.; Moscow: 2014. 8 p. (In Russ.)
- 17. GOST R56664–2015 Non-destructive testing. Evaluation of stress state material engineering products by acoustoelastic methods. General requirements. Standartinform Publ.; Moscow: 2016. 16 p. (In Russ.).
- 18. GOST R52731–2007 Non-destructive testing. Stress evaluation by ultrasound. General requirements. Standartinform Publ.; Moscow: 2007. 7 p. (In Russ.)
- 19. RMG 29–2013 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. Standartinform Publ.: Moscow: 2014. 60 p. (In Russ.)
- 20. Roebben G., Linsinger T., Lamberty A., Emons H. Metrological traceability of the measured values of properties of engineering materials. Metrologia. 2010;47(2):23–31. https://doi.org/10.1088/0026–1394/47/2/S03
- 21. Bahng G. W., Kim J. J., Lee H. M., Huh Y. H. Establishment of traceability in the measurement of the mechanical properties of materials. Metrologia. 2010; 47(2):32–40. https://doi.org/10.1088/0026–1394/47/2/S04
- 22. Czichos H., Saito T., Smith L. Springer Handbook of Metrology and Testing. Berlin: Springer; 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16641-9
- 23. GOST ISO Guide 30-2019 Reference materials. Selected terms and definitions. Standartinform Publ.; Moscow: 2019. 9 p. (In Russ.).
- 24. GOST 1497-84 Metals. Methods of tension test. PPC Izdatel'stvo Standartov; Moscow: 1997. 35 p. (In Russ.).
- 25. RMG 53–2002 State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference materials. Evaluation of metrological characteristics with the use of measurement standards and reference devices. PPC Izdatel'stvo Standartov; Moscow: 2004. 6 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеева Илона Николаевна — научный сотрудник лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем УНИИМ — филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Российская Федерация, 620075, г. Екатеринбург,

ул. Красноармейская, д. 4

e-mail: sertif@uniim.ru

Толмачев Владимир Валерьянович — канд. физ.-мат. наук, заведующий лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем УНИИМ — филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Российская Федерация, 620075, г. Екатеринбург,

ул. Красноармейская, д. 4 e-mail: sertif@uniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilona N. Matveeva – Researcher, Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg,

620075, Russian Federation

e-mail: sertif@uniim.ru

Vladimir V. Tolmachev – PhD (Physical and mathematical sciences), Head of the Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

4 Krasnoarmeyskaya str., Yekaterinburg,

620075, Russian Federation

e-mail: sertif@uniim.ru

